

不同马尾松种源树干植硅体碳封存潜力比较

张云晴^{1,2}, 张 振^{3,4,5}, 孙 凯^{1,2}, 姜培坤^{1,2}

(1. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 3. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 4. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所 浙江省林木育种技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311400; 5. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所 国家林业和草原局马尾松工程技术研究中心, 浙江 杭州 311400)

摘要: 【目的】植硅体封存有机碳 (PhytOC) 在减少大气二氧化碳含量、缓解温室效应等方面具有重要意义。本研究旨在研究不同种源马尾松 *Pinus massoniana* 树干植硅体碳封存潜力存在的差异, 从而筛选出植硅体碳封存潜力较强的马尾松种源。【方法】在浙江淳安姥山林场采集 20 个马尾松种源树干样品, 20 个种源分别来自于全国 11 个省区的 20 个产地。以各样品总有机碳、植硅体、植硅体封存有机碳质量分数及树干生物量的测定结果来分析不同马尾松种源植硅体碳封存潜力的差异。【结果】20 个马尾松种源树干的总有机碳、植硅体、植硅体封存有机碳、植硅体碳质量分数分别变动于 467.6~489.6、0.305~0.845、126.8~210.2、0.049~0.128 g·kg⁻¹; 马尾松标准株树干生物量和植硅体碳储量的变动范围分别为 76.48~295.39 kg·株⁻¹ 和 4.83~31.58 g·株⁻¹; 种源聚类分析可以将 20 个马尾松种源划分为 4 类, 以湖北通山 84、广西恭城 111、江西吉安 63 和广西岑溪 115 植硅体碳封存能力较强的种源为 1 类; 以河南桐柏 21、湖南安化 72、广东信宜 105 为代表的 7 个马尾松种源的植硅体碳封存能力次之; 以浙江淳安 56、贵州都匀 123、福建永定 95 为代表的 8 个马尾松种源为第 3 类; 浙江庆元 54 为植硅体碳封存能力最差的一类。【结论】不同种源马尾松树干的植硅体、植硅体封存有机碳和植硅体碳含量均具有显著性差异 ($P < 0.05$)。广西岑溪 115 的植硅体碳封存能力最强, 因此在马尾松生态系统中, 可通过推广广西岑溪 115 来提高植硅体碳封存量。图 3 表 2 参 35

关键词: 马尾松; 种源; 树干; 植硅体; 植硅体封存有机碳

中图分类号: S718.43

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2020)05-0883-08

A comparative study of the PhytOC sequestration potential in the trunk of *Pinus massoniana* of different provenances

ZHANG Yunqing^{1,2}, ZHANG Zhen^{3,4,5}, SUN Kai^{1,2}, JIANG Peikun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 4. Key Laboratory of Tree Breeding of Zhejiang Province, Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 5. Engineering Research Center of Masson Pine of State Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] As phytolith-occluded organic carbon (PhytOC) plays a unique role in the reduction of atmospheric CO₂ contents and the mitigation of the greenhouse effect, this study, with a comparison conducted

收稿日期: 2019-10-10; 修回日期: 2020-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31600494, 31270667); 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室自主研究项目 (20180207)

作者简介: 张云晴, 从事资源管理与气候变化研究。E-mail: 17816095498@163.com。通信作者: 姜培坤, 教授, 博士生导师, 从事土壤与环境学等研究。E-mail: jiangpeikun@zafu.edu.cn

of the PhytOC sequestration potential of masson pines (*Pinus massoniana*) of different provenances is aimed at the selection of the Masson pine with the highest PhytOC sequestration capacity. [Method] With masson pines of twenty provenances (twenty regions in 11 provinces) chosen at Laoshan Forest Farm which is located in Chun'an County of Zhejiang Province, an analysis was conducted of the contents of total OC, phytoliths, PhytOC as well as the trunk biomass of masson pines to highlight the differences of sequestration potential of masson pines of different provenances. [Result] (1) The contents of total OC, phytoliths, PhytOC, and phytolith carbon mass fraction in the trunks of masson pines were in the range of 467.6–489.6, 0.305–0.845, 126.8–210.2, and 0.049–0.128 g·kg⁻¹ respectively. (2) The trunk biomass and PhytOC stock in the trunks of masson pines were 76.48–295.39 kg·plant⁻¹ and 4.83–31.58 g·plant⁻¹, respectively. (3) As was shown in the cluster analysis, the chosen masson pines of 20 provenances can be divided into four categories: a. Hubei Tongshan 84, Guangxi Gongcheng 111, Jiangxi Jian 63 and Guangxi Cenxi 115 which demonstrate the strongest PhytOC sequestration capacity; b. 7 provenances including Henan Tongbai 21, Hunan Anhua 72 and Guangdong Xinyi 105 which demonstrate relatively strong PhytOC sequestration capacity; c. 8 provenances including Zhejiang Chun'an 56, Guizhou Duyun 123, Fujian Yongding 95; d. Zhejiang Qingyuan 54 which demonstrate the weakest PhytOC sequestration capacity. [Conclusion] Significant differences were shown in the content of phytoliths, PhytOC, and carbon content of phytolith in the trunks of masson pines of different provenances ($P < 0.05$). Guangxi Cenxi 115 demonstrated the highest PhytOC sequestration capacity and should be promoted in plantation in the ecosystem of masson pines so as to increase the sequestration amount of PhytOC. [Ch, 3 fig. 2 tab. 35 ref.]

Key words: masson pine (*Pinus massoniana*); provenance; trunk; phytolith; phytolith-occluded organic carbon (PhytOC)

全球气候变化带来的一系列生态、经济、社会问题日益严重，引发了国际社会的高度重视。导致全球气候变暖的重要原因是二氧化碳(CO₂)年排放量不断增加。目前除工业减排CO₂外，植物固碳已成为解决这一问题的重要途径^[1]。陆地碳汇是全球碳循环的基础，并正在被用来抵消人为CO₂排放量的增加，其中森林生态系统作为陆地生态系统中最大的碳库，存储着整个陆地生态系统80%的地上碳和70%的土壤碳^[2-3]。植硅体是植物根系吸收土壤溶液中的单硅酸[Si(OH)₄]，在蒸腾拉力的作用下沉积于细胞壁、细胞腔或细胞间隙内的非晶质二氧化硅颗粒物^[4-6]。植硅体形成过程中会包裹一定量的有机碳，称为植硅体封存有机碳(phytolith-occluded organic carbon, PhytOC)^[7-8]，这部分被包裹的有机碳由于受到植硅体的保护而具有耐高温和高度抗氧化等特性，如果没有大的地质变迁，便能够在土壤以及沉积物中保存长达数千年甚至数万年之久，从而成为陆地土壤的长期固碳机制之一^[9-11]。因此，植硅体封存的有机碳在减少大气CO₂含量、缓解温室效应等方面具有重要的意义^[12-14]。已有研究主要集中于植硅体碳含量较高的富硅植物，例如水稻*Oryza sativa*^[15]、黍*Panicum miliaceum*、粟*Setaria italica*^[9]、小麦*Triticum aestivum*^[2]、甘蔗*Saccharum officinarum*^[3]等农作物、草地和湿地植物^[16-17]、竹类^[18-20]。马尾松*Pinus massoniana*是分布面积较广的一种森林类型，也是中国松科Pinaceae植物中用途最广的先锋树种。近年来，有学者研究发现：马尾松生态系统有着可观的植硅体碳储量，其叶片中植硅体封存有机碳含量高于同为针叶林的杉木*Cunninghamia lanceolata*甚至高于禾本科Poaceae植物^[21-22]。植物生物量对植硅体碳储量也有着很大的影响^[20, 23]。张振等^[24]研究发现：马尾松树干生物量占到总生物量的77.2%，由此可知马尾松树干植硅体碳汇潜力不可忽视。同一植物不同器官植硅体封存有机碳含量不同^[25]，同一树种不同种源由于适应性和生理生态差异，植硅体封存有机碳储量也会产生差异。关于马尾松不同种源植硅体碳汇差异的研究鲜见报道，本研究对来自全国的20个马尾松种源树干进行采样分析，研究不同马尾松种源树干植硅体碳储量的差异，并聚类分析，筛选出马尾松树干植硅体碳封存潜力较强的种源，为中国马尾松林生态系统植硅体碳封存研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于浙江省淳安县千岛湖东南湖区的姥山林场马尾松种源试验林 (29°33'30"N, 119°02'55"E), 地处中亚热带地区, 雨量充沛, 四季分明, 年平均气温为 17.0 °C, ≥ 10 °C 的年积温为 5 410 °C, 年平均日照时数 1 951 h, 年降水量 1 430 mm, 无霜期 263 d。姥山林场设置的试验地海拔 150 m, 坡度 20°~30°, 土壤为红壤土类的黄红壤亚类, 土壤厚度 80 cm 以上, 土壤有机质 15.80 g·kg⁻¹, 碱解氮 53.50 mg·kg⁻¹, 速效钾 18.50 mg·kg⁻¹, 有效磷 0.99 mg·kg⁻¹, 交换性钙 128.00 mg·kg⁻¹, 交换性镁 9.24 mg·kg⁻¹。

1.2 实验设计

1984 年春, 在姥山林场栽植了来自 14 个省区的 49 个马尾松种源 1 年生裸根苗, 采用双列小区完全随机排列, 重复 8 次 (8 株), 株行距 2 m×2 m, 管理措施一致, 用以筛选速生、优质的马尾松种源^[26]。2017 年 12 月对保存完好的 20 个马尾松种源植株进行调查、采样, 通过每木测定, 得到每个种源的平均木, 随机选取 3 个小区, 每个种源选取胸径与平均木相近的 3 株植株作为标准株, 人工摘取标准株新鲜叶片于样品袋中, 新鲜叶片带回实验室后用去离子水洗净, 105 °C 杀青 25 min, 75 °C 下烘干 48 h, 再磨碎后于塑封袋保存。至 2018 年 4 月, 再次砍伐 20 个种源胸径与平均木相近的 3 株标准株对马尾松进行树干取样, 取得的树干圆盘带回实验室进行烘干磨碎处理, 分析测定。

1.3 样品分析

所有植物样品的碳和氮采用 Elementar Vario MAX CN 碳氮元素分析仪测定; 植物植硅体的提取采用微波消解法^[27], 为了大量提取植硅体而在此方法上有所改进, 用浓硝酸和双氧水大量消煮前处理, 再进行微波消解; 而植硅体封存有机碳的测定同植物碳和氮的测定方法。土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定; 碱解氮采用碱解法测定; 有效磷采用 Bray 法测定; 速效钾采用乙酸铵浸提, 火焰光度法测定; 交换性钙、镁采用 EDTA 滴定法测定^[28]。

1.4 数据的计算和统计

$w_{\text{植硅体}} = m_{\text{植硅体}} / m_{\text{样品}}$, 其中: $w_{\text{植硅体}}$ 为植硅体质量分数 (g·kg⁻¹), $m_{\text{植硅体}}$ 为植硅体质量 (g), $m_{\text{样品}}$ 为样品干质量 (kg)。 $w_{\text{有机碳}} = m_{\text{有机碳}} / m_{\text{植硅体}}$, 其中: $w_{\text{有机碳}}$ 为植硅体封存有机碳质量分数 (g·kg⁻¹), $m_{\text{有机碳}}$ 为植硅体有机碳质量 (g), $m_{\text{植硅体}}$ 为植硅体质量 (kg)。所以, $w_{\text{植硅体碳}} = m_{\text{有机碳}} / m_{\text{样品}}$, 其中: $w_{\text{植硅体碳}}$ 为植硅体碳质量分数 (g·kg⁻¹)。 $C_{\text{植硅体碳}} = B_{\text{树干}} \times w_{\text{植硅体碳}}$, 其中: $C_{\text{植硅体碳}}$ 为标准株树干植硅体碳储量 (g·株⁻¹), $B_{\text{树干}}$ 为树干生物量 (kg·株⁻¹)。3 次重复, 取平均值。数据处理用 SPSS 18.0 完成, 用 Duncan 新复极差法检验不同处理的差异显著性, 并用植硅体质量分数、植硅体封存有机碳质量分数等碳储指标对所有参试种源进行 Q 型聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同马尾松种源树干总有机碳、植硅体、植硅体封存有机碳以及植硅体碳质量分数的比较

表 1 显示: 20 个马尾松种源树干的总有机碳质量分数无显著差异, 其变化范围为 467.6~489.6 g·kg⁻¹, 而在不同种源中树干植硅体质量分数存在显著差异, 表现为安徽太平 32(0.845 g·kg⁻¹)、贵州黄平 122(0.702 g·kg⁻¹) 显著高于湖北通山 84(0.465 g·kg⁻¹)($P < 0.05$), 而后者又显著高于广东乳源 102(0.305 g·kg⁻¹)($P < 0.05$)。不同马尾松种源树干植硅体封存有机碳质量分数的变化范围为 126.8~210.2 g·kg⁻¹, 存在显著差异 ($P < 0.05$), 树干植硅体封存有机碳质量分数以江西吉安 63(210.2 g·kg⁻¹) 最高, 显著高于福建邵武 91(172.4 g·kg⁻¹)($P < 0.05$), 后者又显著高于浙江庆元 54(126.8 g·kg⁻¹)($P < 0.05$)。20 个马尾松种源树干植硅体碳质量分数变化范围为 0.049~0.128 g·kg⁻¹, 也存在显著差异 ($P < 0.05$)。树干植硅体碳质量分数以安徽太平 32(0.128 g·kg⁻¹) 最高, 显著高于贵州黎平 124(0.076 g·kg⁻¹)($P < 0.05$), 后者又显著高于广东乳源 102(0.049 g·kg⁻¹)($P < 0.05$)。

2.2 不同马尾松种源单株树干植硅体碳储量的比较

表 2 可知: 20 个马尾松种源平均胸径和株高变化范围为分别 17.1~32.3 cm 和 16.3~19.5 m。马尾松

表1 不同马尾松种源树干总有机碳、植硅体、植硅体封存有机碳和植硅体碳质量分数的比较

Table 1 Comparison of the contents of total organic carbon(TOC), phytoliths, OC in phytoliths, and phytolith in dry matter in trunk of masson pine from different provenances

种源号	总有机碳/(g·kg ⁻¹)	植硅体/(g·kg ⁻¹)	植硅体封存有机碳/(g·kg ⁻¹)	植硅体碳/(g·kg ⁻¹)
河南桐柏21	489.6±22.6 a	0.421±0.049 cdef	188.9±16.8 abc	0.073±0.020 cdef
安徽太平32	485.9±5.4 a	0.845±0.033 a	148.0±15.9 de	0.128±0.008 a
安徽屯溪33	478.5±13.9 a	0.368±0.075 def	167.5±16.8 cd	0.059±0.013 def
浙江庆元54	484.0±14.3 a	0.519±0.057 c	126.8±11.8 e	0.070±0.016 cdef
浙江淳安56	474.1±9.9 a	0.437±0.062 cdef	148.4±14.2 de	0.064±0.004 def
江西吉安63	483.5±14.5 a	0.380±0.094 cdef	210.2±26.7 a	0.070±0.009 cdef
湖南安化72	488.7±4.8 a	0.330±0.026 ef	177.2±21.6 abcd	0.058±0.006 def
湖南资兴74	478.3±10.8 a	0.405±0.075 cdef	167.2±24.7 cd	0.066±0.003 def
湖北远安81	477.5±14.0 a	0.388±0.079 cdef	183.4±16.4 abcd	0.067±0.006 cdef
湖北通山84	475.5±3.4 a	0.465±0.119 cde	204.5±11.8 ab	0.091±0.026 bc
福建邵武91	475.8±13.6 a	0.410±0.082 cdef	172.4±10.0 bcd	0.069±0.021 cdef
福建永定95	467.6±8.2 a	0.395±0.094 cdef	147.6±22.1 de	0.051±0.002 ef
广东乳源102	479.9±10.9 a	0.305±0.074 f	162.2±18.3 cd	0.049±0.013 f
广东信宜105	476.5±10.2 a	0.481±0.069 cd	194.1±19.3 abc	0.111±0.024 ab
广西恭城111	474.7±10.5 a	0.396±0.036 cdef	205.1±15.5 ab	0.081±0.008 cd
广西岑溪115	472.9±5.0 a	0.519±0.033 c	205.7±5.5 ab	0.107±0.010 ab
贵州黄平122	476.5±11.6 a	0.702±0.103 b	187.6±33.7 abc	0.121±0.009 a
贵州都匀123	476.6±8.2 a	0.364±0.002 def	148.5±5.5 de	0.054±0.002 ef
贵州黎平124	469.1±2.8 a	0.465±0.119 cde	187.0±27.6 abc	0.076±0.001 cde
四川南江131	477.1±12.9 a	0.335±0.043 ef	190.3±19.2 abc	0.059±0.010 def

说明: 表内的数据为平均值±标准差; 同列不同字母表示不同种源间差异显著($P<0.05$)

标准株树干生物量最高的是广西岑溪 115(295.39 kg·株⁻¹), 最低为河南桐柏 21(76.48 kg·株⁻¹); 马尾松标准株树干植硅体碳储量最高的是广西岑溪 115(31.58 g·株⁻¹), 最低的是湖南安化 72(4.83 g·株⁻¹), 前者是后者的 6.54 倍。

2.3 不同马尾松种源碳储指标相关性分析

图 1 相关性分析发现: 不同马尾松种源树干植硅体质量分数与植硅体封存有机碳质量分数无相关关系, 而植硅体质量分数与植硅体碳质量分数呈极显著的正相 ($R^2=0.7513$, $P<0.01$)。20 个马尾松种源的标准株树干植硅体碳储量与其树干生物量 ($R^2=0.6073$, $P<0.01$) 或树干植硅体碳质量分数 ($R^2=0.4388$, $P<0.01$) 之间均呈极显著正相关, 而马尾松标准株的叶片与树干植硅体质量分数、植硅体碳储量无相关关系 (图 2)。

2.4 不同马尾松种源划分和优良种源选择

基于上述结果, 利用马尾松总有机碳质量分数、树干植硅体质量分数、植硅体封存有机碳质量分数等指标的均值对 20 个马尾松种源进行 Q 聚类分析 (图 3)。以图中 m 线为阈值可以将 20 个种源划分为 4 类, 第 1 类为湖北通山 84、广西恭城 111、江西吉安 63 以及广西岑溪 115, 此类马尾松种源总有机碳质量分数为 472.9~483.5 g·kg⁻¹, 植硅体封存有机碳质量分数最高, 为 204.5~210.2

表2 不同马尾松种源标准株树干植硅体碳储量的比较

Table 2 Comparison of PhytOC stock in trunk of masson pine plant from different provenances

种源号	胸径/ cm	株高/ m	树干生物量/ (kg·株 ⁻¹)	标准株植硅体 碳储量/(g·株 ⁻¹)
河南桐柏21	17.1	17.0	76.48	5.61
安徽太平32	21.8	17.0	124.85	16.03
安徽屯溪33	22.5	19.0	143.76	8.54
浙江庆元54	26.1	19.1	195.11	13.64
浙江淳安56	21.1	18.3	122.59	7.88
江西吉安63	20.8	17.4	114.65	8.08
湖南安化72	18.0	16.5	82.77	4.83
湖南资兴74	26.7	18.2	197.10	13.01
湖北远安81	21.5	18.8	129.52	8.70
湖北通山84	22.5	18.5	141.33	12.93
福建邵武91	27.2	19.2	212.87	14.60
福建永定95	28.4	18.9	229.44	11.79
广东乳源102	28.8	19.5	241.78	11.94
广东信宜105	25.1	19.3	182.05	20.23
广西恭城111	29.3	19.3	247.94	20.08
广西岑溪115	32.3	18.6	295.39	31.58
贵州黄平122	22.3	18.4	137.86	16.68
贵州都匀123	19.6	17.2	100.83	5.45
贵州黎平124	24.1	19.0	164.73	12.55
四川南江131	20.2	16.3	103.33	6.12

说明: 树干生物量根据模型计算得到^[29]

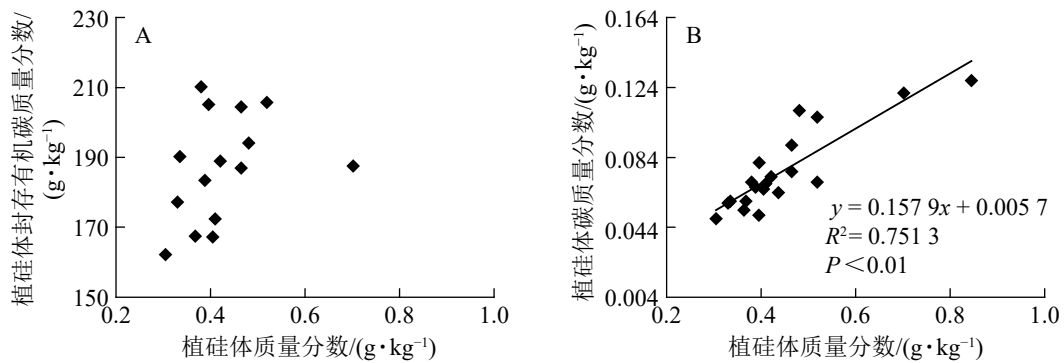


图 1 不同马尾松种源植硅体质量分数与植硅体封存有机碳质量分数 (A)、植硅体碳质量分数 (B) 之间的相关性

Figure 1 Correlation between phytolith contents and OC in phytoliths(A), PhytOC contents in dry matter(B) of masson pine trunks

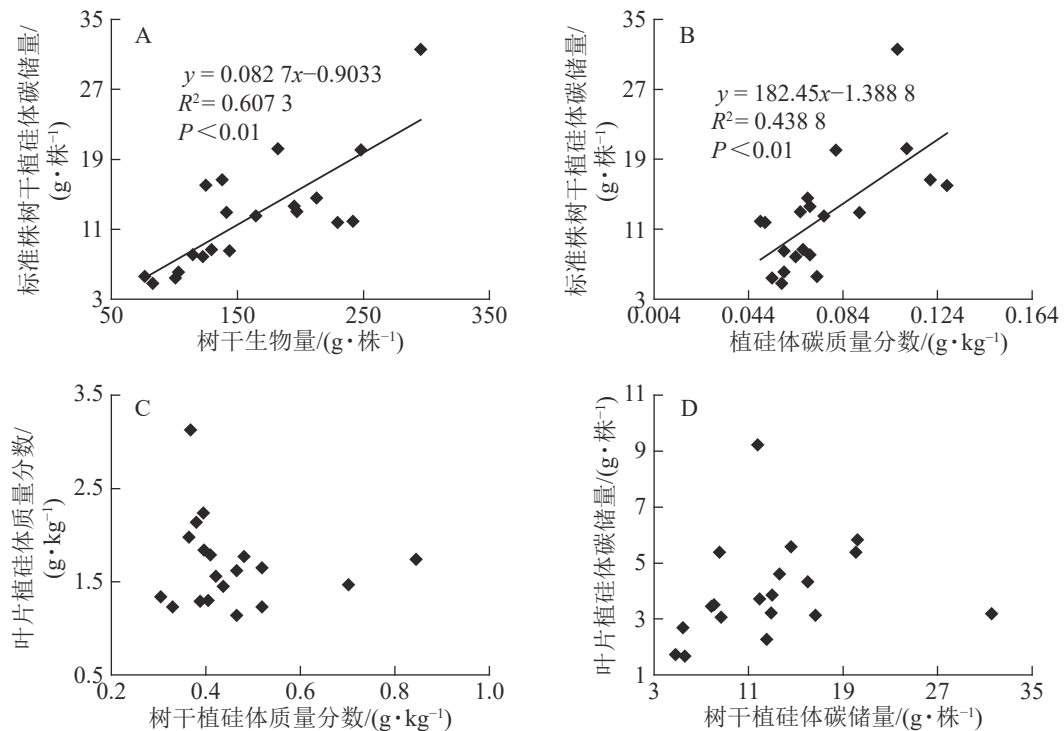


图 2 不同马尾松种源标准株植硅体碳储量与树干生物量 (A)、标准株植硅体碳储量与植硅体碳质量分数 (B)、标准株叶片植硅体质量分数与树干植硅体质量分数 (C) 或标准株叶片植硅体碳储量与标准株树干植硅体碳储量 (D) 之间相关性

Figure 2 Correlation between PhytOC stock and trunk biomass (A), PhytOC stock and PhytOC contents in dry matter (B), phytolith contents in the leaves and phytolith contents in the trunks (C), PhytOC stock of the leaves and PhytOC stock of the trunks (D)

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 植硅体碳质量分数也整体相对较高, 为 $0.070 \sim 0.107 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 标准株马尾松树干植硅体碳储量为 $8.08 \sim 31.58 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 其中广西岑溪 115 ($31.58 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$) 标准株树干植硅体碳储量最高; 第 2 类马尾松种源包括河南桐柏 21、湖南安化 72、广东信宜 105 等 7 个种源, 此类马尾松种源总有机碳质量分数为 $469.1 \sim 489.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 树干植硅体封存有机碳质量分数为 $177.2 \sim 194.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 植硅体碳质量分数为 $0.058 \sim 0.121 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 标准株马尾松树干植硅体碳储量为 $4.83 \sim 20.23 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$; 第 3 类为浙江淳安 56、贵州都匀 123、福建永定 95、安徽太平 32 等 8 个种源, 这类马尾松种源总有机碳质量分数为 $467.6 \sim 485.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 树干植硅体封存有机碳质量分数为 $147.6 \sim 172.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 植硅体碳质量分数为 $0.049 \sim 0.128 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 标准株树干植硅体碳储量变动为 $5.45 \sim 16.03 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$; 浙江庆元 54 为第 4 类马尾松种源, 树干植硅体碳封存能力最差, 总有机碳质量分数为 $484.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 植硅体封存有机碳质量分数为 $126.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 植硅体碳质量分数为 $0.070 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 标准株树干植硅体碳储量为 $13.64 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。

3 讨论

3.1 马尾松树干的植硅体、植硅体封存有机碳与植硅体碳质量分数

植硅体的形成与植物富集硅的能力有关,因此关于植硅体的研究大多集中于高富集硅植物叶片(禾本科)以及林下土壤中;植硅体的形成还与植物体自身蒸腾作用有关,而植物蒸腾作用主要发生在植物叶片表面^[6, 30-31],对地上部分其他器官的植硅体碳汇研究相对较少。以马尾松(非禾本科)为代表的针叶林,自身植硅体的形成受到叶片(针叶)蒸腾作用和植物自身富硅能力的限制,植物植硅体质量分数相对较少。

分析发现:马尾松树干植硅体质量分数与植硅体封存有机碳质量分数之间无相关性,与前人研究结果一致^[2, 9, 20, 32],说明植硅体封存有机碳质量分数并不是由植硅体质量分数决定的,而可能与植硅体自身固碳能力和固碳效率有关;马尾松树干的植硅体质量分数和植硅体碳质量分数呈极显著的正相关($R^2=0.7513$, $P<0.01$),这与中国亚热带重要树种植硅体碳研究结果^[21]和苦竹 *Pleioblastus amarus* 林碳汇的研究结果^[25]一致。植硅体碳质量分数还受到其他多种因素的影响,SONG等^[23]对不同森林类型植硅体碳封存研究发现:植物植硅体碳质量分数与硅质量分数存在相关性;LI等^[33]研究发现:植物植硅体碳质量分数还与植物吸收利用二氧化碳的速率相关。

3.2 马尾松生态系统植硅体碳储量的影响因素

标准株马尾松树干植硅体碳储量是由树干生物量和植硅体碳质量分数相乘得到的,20个马尾松种源的标准株树干植硅体碳储量与其树干生物量($R^2=0.6073$, $P<0.01$)或植硅体碳质量分数($R^2=0.4388$, $P<0.01$)之间均存在极显著正相关,说明标准株马尾松树干植硅体碳储量在一定程度上有随自身树干生物量和植硅体碳质量分数的增加而呈增加的趋势。而马尾松标准株的叶片与树干植硅体质量分数、植硅体碳储量无相关关系,这可能是植硅体自身固碳能力和固碳效率不同导致的。

本研究20个马尾松种源叶片植硅体碳质量分数范围为 $0.165\sim 0.520\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,明显高于马尾松树干植硅体碳质量分数($0.049\sim 0.128\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),叶片生物量范围为 $7.53\sim 18.90\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}$,树干生物量范围为 $76.48\sim 295.39\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}$,计算结果显示标准株叶片植硅体碳储量范围为 $1.67\sim 9.22\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$,标准株树干植硅体碳储量范围为 $4.83\sim 31.58\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$,可见树干巨大的生物量对植硅体碳储量的影响较大。

3.3 植硅体碳储量的不同树种和种源之间的差异

植硅体碳储量是评价植物生态系统现存植硅体碳封存潜力的一个重要指标,其大小不仅与植物种类有关,而且还与植物的种源有关。5种林分的凋落物植硅体碳储量比较发现:最大的毛竹 *Phyllostachys edulis* 林植硅体碳储量是最小的杉木林植硅体碳储量的6.8倍^[34];8种散生竹地上部分植硅体碳储量研究发现:不同竹种间差异显著,最大的淡竹 *Phyllostachys glauca* 植硅体碳储量是最小的高节竹 *Phyllostachys prominens* 植硅体碳储量的10.8倍^[35];本研究马尾松标准株树干植硅体碳储量最高的是广西岑溪115,最低的是湖南安化72,前者是后者的6.5倍。上述结果说明:植硅体碳储量在不同树种和种源之间存在着巨大差异,因而对同一种源森林生态系统来说,有可能通过选择高植硅体碳储量的林木来大大增加其植硅体碳的封存量。

4 结论

20个马尾松种源树干的植硅体质量分数、植硅体封存有机碳质量分数以及植硅体碳质量分数都有着

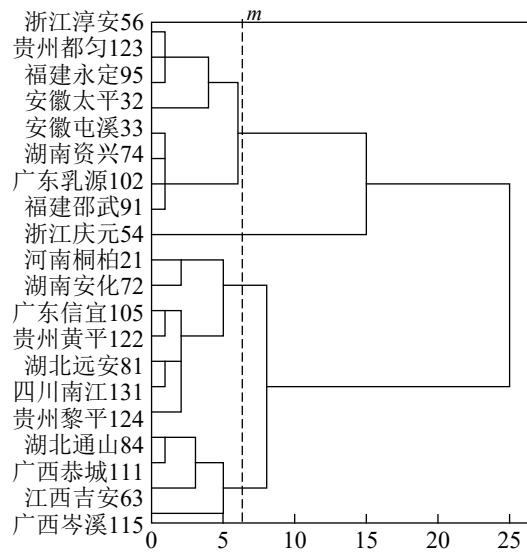


图3 参试种源的Q型聚类分析树形图

Figure 3 Dendrogram of hierarchical cluster analysis for tested

显著的差异 ($P < 0.05$), 其中树干植硅体质量分数最高的是安徽太平 $32(0.845 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1})$, 最低的是广东乳源 $102(0.305 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1})$; 树干植硅体封存有机碳质量分数最高的是江西吉安 $63(210.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1})$, 最低的是浙江庆元 $54(126.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1})$; 而植硅体碳质量分数最高的是安徽太平 $32(0.128 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1})$, 最低的是广东乳源 ($0.049 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。由于生物量的差异, 标准株树干植硅体碳储量最高的是广西岑溪 $115(31.58 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1})$ 。综合聚类分析, 湖北通山 84、广西恭城 111、江西吉安 63 以及广西岑溪 115 为植硅体碳汇能力较强的种源, 浙江庆元 54 植硅体碳汇能力最差。

5 参考文献

- [1] 韦荣华. 应对气候变化林业作用特殊[J]. 中国林业, 2007(8): 14 – 17.
WEI Ronghua. Forestry plays a special role in coping with climate change [J]. *Chin For*, 2007(8): 14 – 17.
- [2] PARR J F, SULLIVAN L A. Phytolith occluded carbon and silica variability in wheat cultivars [J]. *Plant Soil*, 2011, **342**: 165 – 171.
- [3] JEFF P J, SULLIVAN L A, QUIRK R. Sugarcane phytoliths: encapsulation and sequestration of a long-lived carbon fraction [J]. *Sugar Tech*, 2009, **11**(1): 17 – 21.
- [4] ROVNER I. Plant opal phytolith analysis: major advances in archmeobotanical research[M]//SCHIFFER M B. *Advances in Archmeological Method and Theory Vol. 6*. New York: Academic Press, 1983: 225 – 266.
- [5] PIPERNO D R. *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archmeologists and Paleoecologists*[M]. London: Altamira Press, 2006: 117 – 124.
- [6] PARR J F, SULLIVAN L A. Soil carbon sequestration in phytoliths [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, **37**(1): 117 – 124.
- [7] ZUO Xinxin, LÜ Houyuan, ZHAO Yangu. Distribution of soil phytolith-occluded carbon in the Chinese Loess Plateau and its implications for silica-carbon cycles[J]. *Plant & Soil*, 2014, **374**(1): 223 – 232.
- [8] JONES R L, BEAVERS A H. Aspects of catenary and depth distribution of opal phytoliths in Illinois soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1964, **28**(3): 413 – 416.
- [9] ZUO Xinxin, LÜ Houyuan. Carbon sequestration within millet phytoliths from dry-farming of crops in China [J]. *Chin Sci Bull*, 2011, **56**(32): 3451 – 3456.
- [10] FISHKIS O, INGWERSEN J, STRECK T. Phytolith transport in sandy sediment: experiments and modeling [J]. *Geoderma*, 2009, **151**(3): 168 – 178.
- [11] WILDING L P. Radiocarbon dating of biogenetic opal [J]. *Science*, 1967, **156**(3771): 66 – 67.
- [12] YING Yuqi, LOU Kangyi, XIANG Tingting, et al. PhytOC stock in forest litter in subtropical forests: effects of parent material and forest type [J]. *Ecol Eng*, 2016, **97**: 297 – 303.
- [13] XIANG Tingting, YING Yuqi, TENG Jiangnan, et al. Sympodial bamboo species differ in carbon bio-sequestration and stocks within phytoliths of leaf litters and living leaves [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, **23**(19): 1 – 9.
- [14] SONG Zhaoliang, PARR J F, GUO Fengshan. Potential of global cropland phytolith carbon sink from optimization of cropping system and fertilization [J]. *Plos One*, 2013, **8**(9): e73747 – e73747. doi: 10.1371/journal.pone.0073747
- [15] LI Zimin, SONG Zhaoliang, PARR J F, et al. Occluded C in rice phytoliths: implications to biogeochemical carbon sequestration [J]. *Plant Soil*, 2013, **370**(1/2): 1 – 9.
- [16] LI Zimin, SONG Zhaoliang, JIANG Peikun. Biogeochemical sequestration of carbon within phytoliths of wetland plants: a case study of Xixi wetland, China [J]. *Chin Sci Bull*, 2013, **58**(20): 2480 – 2487.
- [17] SONG Zhaoliang, LIU Hongyan, SI Yong, et al. The production of phytoliths in China's grasslands: implications to the biogeochemical sequestration of atmospheric CO₂ [J]. *Glob Change Biol*, 2012, **18**(12): 3647 – 3653.
- [18] 李蓓蕾. 竹子植硅体碳汇及其与竹类和岩性的关系研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
LI Beilei. *Carbon Sink of Bamboo Phytolith and Its Relationship with Bamboo and Lithology*[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2014.
- [19] 冯晟斐, 黄张婷, 杨杰, 等. 3 种不同生态型竹种植硅体碳汇比较研究[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(1): 154 – 164.
FENG Shengfei, HUANG Zhangting, YANG Jie, et al. Comparison of phytOC sink for three different ecotypes of bamboos [J]. *J Nat Resour*, 2017, **32**(1): 154 – 164.
- [20] PARR J F, SULLIVAN L A, CHEN B, et al. Carbon bio-sequestration within the phytoliths of economic bamboo species

- [J]. *Global Change Biol*, 2010, **16**(10): 2661 – 2667.
- [21] 应雨骐, 项婷婷, 李永夫, 等. 中国亚热带重要树种植硅体碳封存潜力估测[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(1): 133 – 140.
YING Yuqi, XIANG Tingting, LI Yongfu, *et al.* Estimation of carbon sequestration potential of important tree plants in subtropical China [J]. *J Nat Resour*, 2015, **30**(1): 133 – 140.
- [22] 林维雷, 应雨骐, 姜培坤, 等. 浙江南部亚热带森林土壤植硅体碳的研究[J]. *土壤学报*, 2015, **52**(6): 1365 – 1373.
LIN Weilei, YING Yuqi, JIANG Peikun, *et al.* Study on phytolith-occluded organic carbon in soil of subtropical forest of southern Zhejiang [J]. *Acta Pedol Sin*, 2015, **52**(6): 1365 – 1373.
- [23] SONG Zhaoliang, LIU Hongyan, LI Beilei, *et al.* The production of phytolith-occluded carbon in China's forests implications to biogeo-chemical carbon sequestration [J]. *Glob Change Biol*, 2013, **19**(9): 2907 – 2915.
- [24] 张振, 金国庆, 周志春, 等. 马尾松广东种源与湖北种源的人工林生物量分配差异[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(2): 271 – 278.
ZHANG Zhen, JIN Guoqing, ZHOU Zhichun, *et al.* Biomass allocation differences with *Pinus massoniana* in Guangdong and Hubei Provenances [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2019, **36**(2): 271 – 278.
- [25] 杨杰, 吴家森, 姜培坤, 等. 苦竹林植硅体碳与硅的研究[J]. *自然资源学报*, 2016, **31**(2): 299 – 309.
YANG Jie, WU Jiasen, JIANG Peikun, *et al.* Study on phytosilicate carbon and silicon in bitter bamboo forest [J]. *J Nat Resour*, 2016, **31**(2): 299 – 309.
- [26] 刘清华, 金国庆, 张蕊, 等. 24年生马尾松生长、形质和木材基本密度的种源变异与种源区划[J]. *林业科学*, 2009, **45**(10): 55 – 61.
LIU Qinghua, JIN Guoqing, ZHANG Rui, *et al.* Source variation and provenance provenancealization of growth, shape and trunk basic density of 24-year-old *Pinus massoniana* [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(10): 55 – 61.
- [27] PARR J F, DOLIC V, LANCASTER G, *et al.* A microwave digestion method for the extraction of phytoliths from herbarium specimens [J]. *Rev Palaeobot Palynol*, 2001, **116**(3/4): 203 – 212.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [29] 曾伟生. 全国立木生物量方程建模方法研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
ZENG Weisheng. *Modeling Method of National Standing Tree Biomass Equation*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [30] 徐德克, 李泉, 吕厚远. 棕榈科植硅体形态分析及其环境意义[J]. *第四纪研究*, 2005, **25**(6): 777 – 783.
XU Deke, LI Quan, LÜ Houyuan. Morphological analysis of phytoliths in palmeae and its environmental significance [J]. *Quate Sci*, 2005, **25**(6): 777 – 783.
- [31] 李仁成. 竹叶及其植硅体类脂物的分类学意义及其季节性变化[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
LI Rencheng. *Taxonomic Significance and Seasonal Variations of Lipid from Bamboo Leaf and Its Phytolith*[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [32] PARR J F, SULLIVAN L A, QUIRK R. Sugarcane phytoliths: encapsulation and sequestration of a long-lived carbon fraction[J]. *Sugar Tech*, 2009, **11**(1): 1721. doi: 10.1007/s12355-009-0003-y.
- [33] LI Zimin, SONG Zhaoliang, LI Beilei. The production and accumulation of phytolith-occluded carbon in Baiyangdian reed wetland of China [J]. *Appl Geochem*, 2013, **37**: 117 – 124.
- [34] 应雨骐, 项婷婷, 林维雷, 等. 中国亚热带5种林分凋落物层植硅体碳的封存特性[J]. *林业科学*, 2015, **51**(3): 1 – 7.
YING Yuqi, XIANG Tingting, LIN Weilei, *et al.* Phytolith-occluded carbon in litters of different stands in the subtropics of China [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51**(3): 1 – 7.
- [35] 杨杰. 中国重要散生竹生态系统植硅体碳汇研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.
YANG Jie. *Phytolith-occluded Carbon Sequestration of Typical Monopodial Bamboo Ecosystems in China*[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2016.